

横浜赤レンガ倉庫でのフラクタル日除けを用いた暑さ対策効果の調査

関浩二、松島由佳、岩崎満、小倉智代（横浜市環境科学研究所）、
内藤純一郎（横浜市環境創造局）、
村上徹也、堀越彩織、菊池由紀子（横浜市水道局）、
保清人（株式会社ロスフィー）

Study on effect of countermeasures against heat using fractal sunshades at Yokohama Red Brick Warehouse

Koji Seki, Yuka Matsushima, Mitsuru Iwasaki, Tomoyo Ogura (Yokohama Environmental Science Research Institute),
Junichiro Naito (Yokohama Environmental Planning Bureau),
Tetsuya Murakami, Saori Horikoshi, Yukiko Kikuchi (Yokohama Waterworks Bureau),
Kiyohito Tamotsu (LOSFEE Co., Ltd.)

キーワード：フラクタル日除け、暑さ対策、乾球温度、黒球温度、暑さ指数

要 旨

夏の暑さによる身体へのストレスを低減させるための暑さ対策技術の一つに人工日除けがある。今回、横浜赤レンガ倉庫において、フラクタル日除け（樹木の葉の形状を模して放熱特性を高めた人工日除け）の暑さ対策効果の調査を実施した。調査の結果、フラクタル日除けの下の地点では、日なたの地点に比べて、気温（乾球温度）、黒球温度、暑さ指数、上方向及び下方向からの日射量、下方向からの赤外放射量が低下していた。過去に実施した公園内の緑陰下での測定結果と比較したところ、フラクタル日除けの設置により、ある程度の暑さ対策の効果を期待できることが示唆された。

1. はじめに

横浜市の平均気温は長期的に上昇傾向にあり、夏季の熱中症患者数の増加など人の健康への悪影響が懸念されている。夏の暑さによる身体へのストレスを低減させるためには、日射の低減、地表面等の高温化抑制・冷却、空気の冷却が効果的と言われており、具体的な暑さ対策技術の一つに人工日除けがある¹⁾。

人工日除けの中でも、2008年頃に酒井らが開発したフラクタル日除け²⁾は、樹木の葉の形状を模して放熱特性を高めることで日除け部分が熱くなるのを防ぐ製品である。そのため、従来の人工日除けよりも暑さ対策効果が高いと言われており、その効果についていくつかの報告事例がある^{3), 4)}。

今回、横浜市内での暑さ対策の推進の一環として、横浜赤レンガ倉庫において、フラクタル日除けの暑さ対策効果の調査を実施した。今回得られた調査結果と過去に実施した公園内の緑陰下での測定結果との比較を行い、フラクタル日除けの暑さ対策効果について定量的な考察を行ったので、報告する。

2. 方法

2-1 調査期間、調査地点及び測定項目

2016年7月20日～24日に横浜赤レンガ倉庫（住所：横浜市中区新港一丁目1）のイベント広場に、株式会社ロスフィー製のフラクタル日除け（製品名：こもれび、素材：ポリエステル樹脂、大きさ：幅9m×奥行5.4m×高さ2.8m）を図1のように設置した。フラクタル

日除けの設置は、横浜市水道局主催の「打ち水大作戦 2016@よこはま 打ち水初め式典」（7月20日開催）の機会を活用し、株式会社横浜赤レンガの協力のもとで実施した。

設置期間のうち、7月20日13時50分～16時、及び、7月24日12時30分～16時40分に、フラクタル日除けの下の地点及び日なたの地点の2地点で、気温（以下、「乾球温度」という。）、黒球温度、相対湿度、日射量及び赤外放射量を1分間隔で測定した。測定地点を図2に示す。また、フラクタル日除けの下に設置した測定器を図3に示す。なお、調査期間の気象概況は、横浜地方气象台での観測によると、7月20日13時50分～16時の天気は曇、風速は5.1～7.6 m/s、降水なしであり、7月24日12時30分～16時40分の天気は晴、風速は5.0～8.4 m/s、降水なしであった。



図1 フラクタル日除けの設置風景

乾球温度及び相対湿度の測定では、測定器のセンサーを自作のシェルターに格納し、気象庁での温度計設置の基準⁵⁾に準拠して、地面から高さ約 1.5 m の位置で測定を行った。黒球温度の測定では、センサー部を直径約 15 cm の黒球（株式会社安藤計器製 CK-150）に格納し、地面から高さ約 1.5 m の位置で測定を行った。日射量及び赤外放射量の測定では、地面から高さ約 30 cm の位置で測定を行った。

また、7月20日正午頃に赤外線サーモカメラで地面の表面温度を測定した。測定に使用した測定器の型式及び仕様を表1に示す。

2-2 暑さ指数の算出

暑さ指数とは、熱中症を予防することを目的として、1957年にYaglouとMinard⁶⁾によって提案された指標であり、人体と外気との熱のやりとり（熱収支）に着目し、人体の熱収支に与える影響の大きい湿度、日射・輻射などの周辺の熱環境、気温の3つを取り入れたものである。

暑さ指数は労働環境や運動環境の指針として有効であると考えられている。日常生活に関する指針としては2013年に日本気象学会が「日常生活における熱中症予防指針（Ver.3）」⁷⁾を公表しており、運動に関する指針としては公益財団法人日本体育協会が「熱中症予防運動指針」⁸⁾を公表している。また、労働環境における暑さ指数について、国際的にはISO 7243⁹⁾、国内ではJIS Z 8504¹⁰⁾として規格化されている。

屋外での暑さ指数 [°C]は、湿球温度を t_w [°C]、黒球温度を t_g [°C]、乾球温度を t_d [°C]とすると、式(1)で与えられる。

$$WBGT = 0.7 t_w + 0.2 t_g + 0.1 t_d \quad (1)$$

本調査では、乾球温度 t_d 及び黒球温度 t_g の実測値、並びに、乾球温度及び相対湿度の実測値から算出した湿球温度 t_w の計算値を用いて、暑さ指数を算出した。

湿球温度 t_w の計算値の算出の際には、Sprung の式¹¹⁾を使用し、水の飽和蒸気圧の近似式として Tetens のパラメータ値¹²⁾による August-Roche-Magnus の式^{13), 14)}を使用した。



図2 測定地点

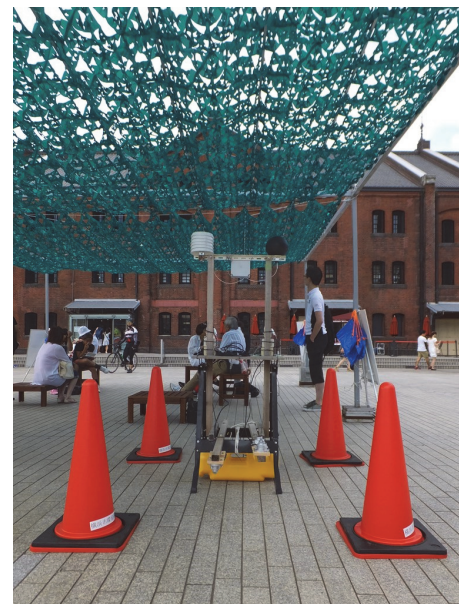


図3 フラクタル日除けの下に設置した測定器

表1 測定に使用した測定器の型式・仕様

測定項目	乾球温度 (気温)	黒球温度	相対湿度	日射量	赤外放射量	地面の 表面温度
メーカー	(株) ティアンドデイ			Hukseflux Thermal Sensors B.V.		日本アビオニクス (株)
型式	TR-52i	TR-72wf		LP02	IR02	R500S
仕様	<u>測定範囲</u> -60~155°C <u>測定精度</u> ±0.3°C (-20~80°C) <u>測定分解能</u> 0.1°C	<u>測定範囲</u> 10~95%RH <u>測定精度</u> ±5%RH (25°C、 50%RH) <u>測定分解能</u> 1%RH		<u>測定範囲</u> 0~2000W/m ² <u>測定波長範囲</u> 305~2800nm	<u>測定範囲</u> 0~1000W/m ² <u>測定波長範囲</u> 4.5~50 μm	<u>測定範囲</u> -40~120°C <u>測定精度</u> ±1°C (20~30°C) <u>測定視野角</u> 64° × 48° (2倍視野拡大 レンズ使用)

3. 結果と考察

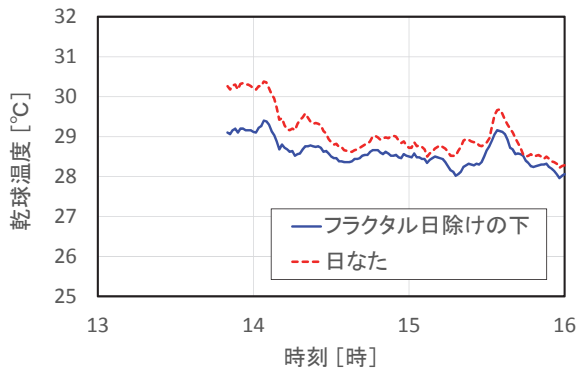
3-1 乾球温度、黒球温度及び相対湿度

フラクタル日除けの下の地点及び日なたの地点の2地点での、2016年7月20日13時50分～16時及び7月24日12時30分～16時40分の乾球温度、黒球温度及び相対湿度の測定結果を図4に示す。

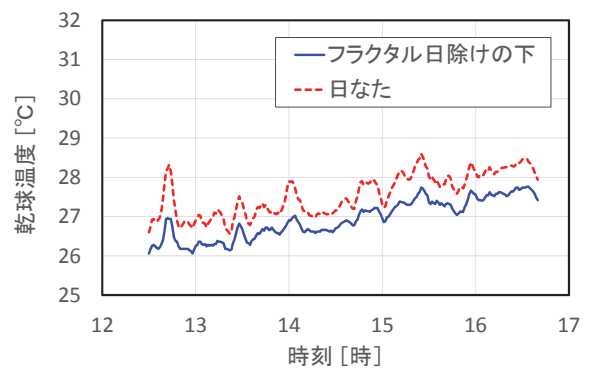
乾球温度及び黒球温度は、調査期間内の全ての時間帯で、フラクタル日除けの下の地点では日なたの地点を下回っていた。

乾球温度は、フラクタル日除けの下の地点では日なたの地点に比べて、7月24日12時43分に最大で1.4℃、調査期間中の平均では0.6℃低下していた。

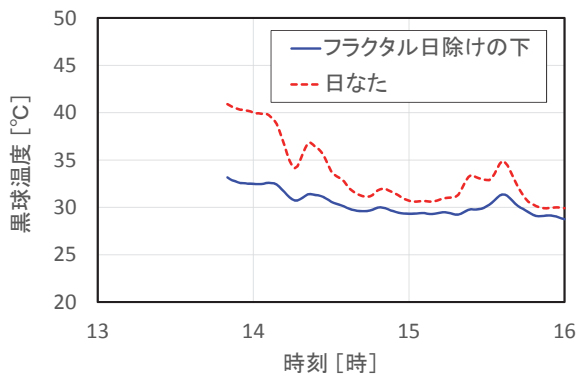
黒球温度は、フラクタル日除けの下の地点では日なたの地点に比べて、7月24日12時45分に最大で9.8℃、調査期間中の平均では4.8℃低下していた。また、乾球温度の低下量が最大となる7月24日12時43分には、黒球温度は9.4℃低下していた。



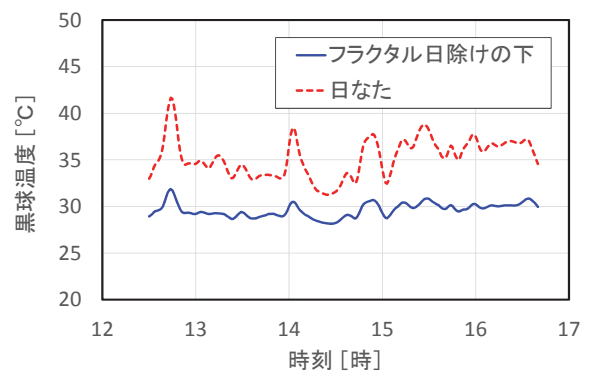
(ア) 乾球温度 (7月20日)



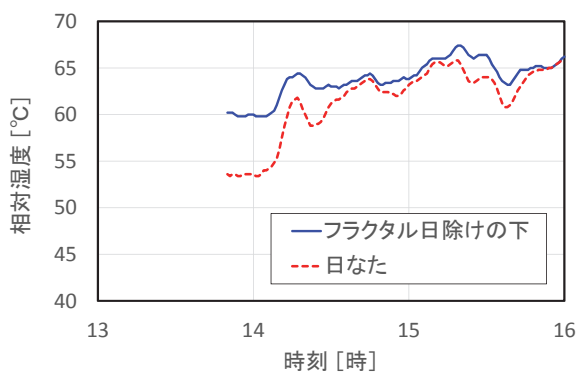
(イ) 乾球温度 (7月24日)



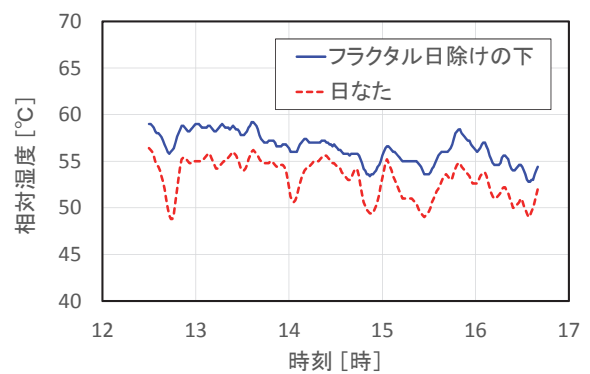
(ウ) 黒球温度 (7月20日)



(エ) 黒球温度 (7月24日)



(オ) 相対湿度 (7月20日)



(カ) 相対湿度 (7月24日)

図4 乾球温度・黒球温度・相対湿度の測定結果

3-2 暑さ指数

フラクタル日除けの下の地点及び日なたの地点の2地点での、7月20日13時50分～16時及び7月24日12時30分～16時40分の暑さ指数の計算結果を図5に示す。

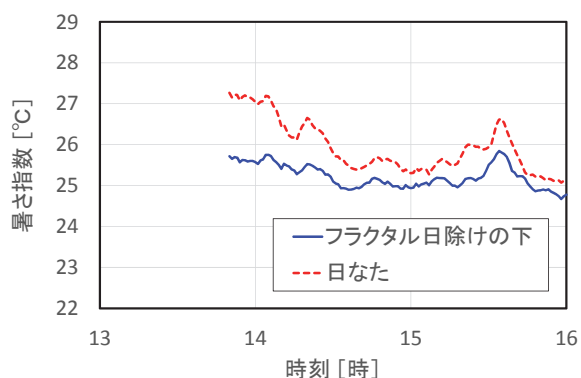
暑さ指数も、乾球温度及び黒球温度と同様に、調査期間内の全ての時間帯で、フラクタル日除けの下の地点では日なたの地点を下回っており、7月24日12時43分に最大で2.0℃、調査期間中の平均では1.0℃低下していた。7月20日の調査では、日なたでは全ての時間帯で暑さ指数は警戒(25℃以上30℃未満)の範囲内だったのに対し、フラクタル日除けの下では暑さ指数が注意(25℃未満)の範囲内となる時間帯もあった。

3-3 日射量

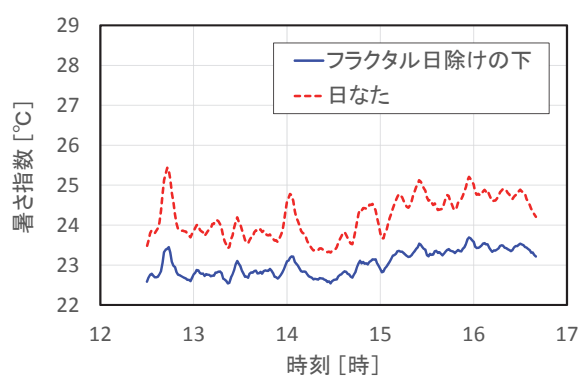
フラクタル日除けの下の地点及び日なたの地点の2地点での、7月20日13時50分～16時及び7月24日12時30分～16時40分の上方向及び下方向からの日射量の測定結果を図6に示す。

上方向からの日射量は、調査期間内の全ての時間帯で、フラクタル日除けの下の地点では日なたの地点を下回っており、7月24日15時34分に最大で80%、調査期間中の平均では59%低下していた。

また、乾球温度の低下量が最大となる7月24日12時43分には、上方向からの日射量は736 W/m²低下しており、低下量の割合は74%であった。

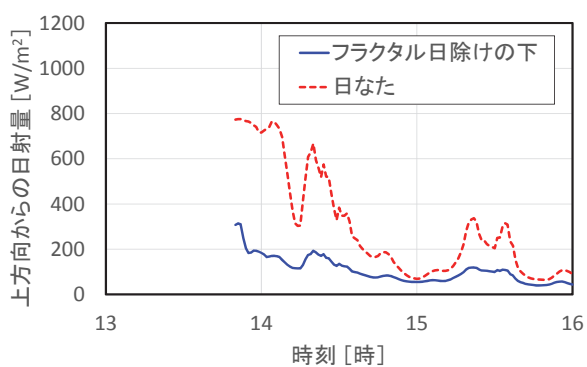


(ア) 暑さ指数 (7月20日)

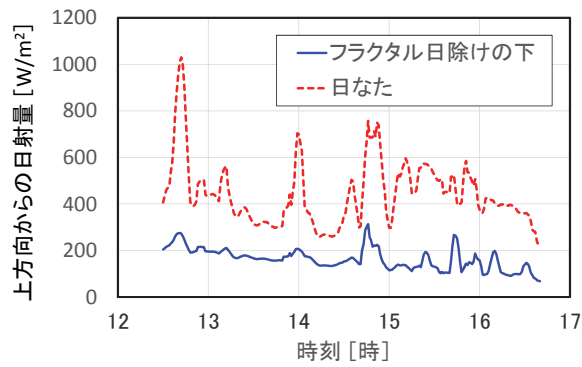


(イ) 暑さ指数 (7月24日)

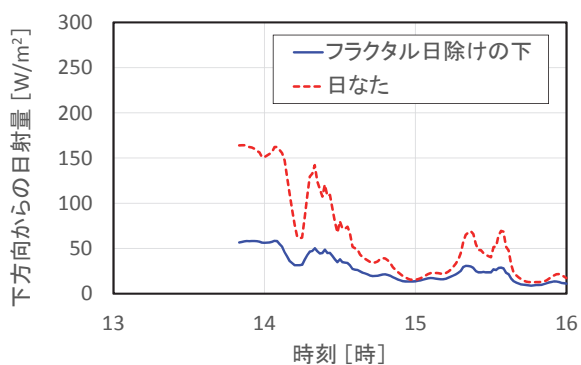
図5 暑さ指数の計算結果



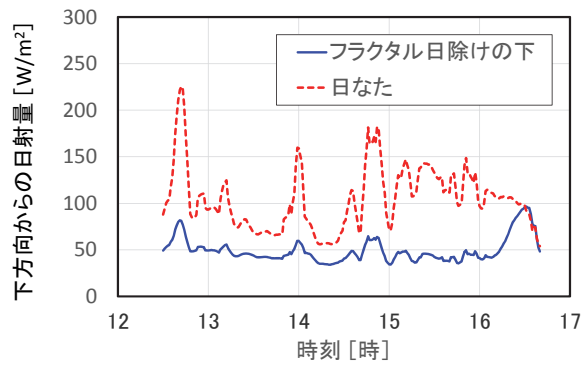
(ア) 上方向からの日射量 (7月20日)



(イ) 上方向からの日射量 (7月24日)



(ウ) 下方向からの日射量 (7月20日)



(エ) 下方向からの日射量 (7月24日)

図6 上方向及び下方向からの日射量の測定結果

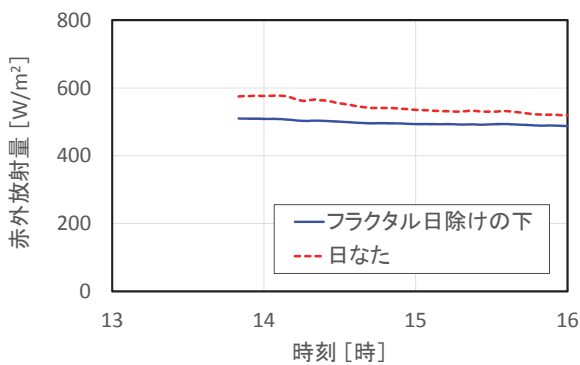
下方向からの日射量も、調査期間内のほぼ全ての時間帯で、フラクタル日除けの下の地点では日なたの地点を下回っており、7月24日15時21分に最大で70%、調査期間中の平均では48%低下していた。

また、乾球温度の低下量が最大となる7月24日12時43分には、下方向からの日射量は146 W/m²低下しており、低下量の割合は65%であった。

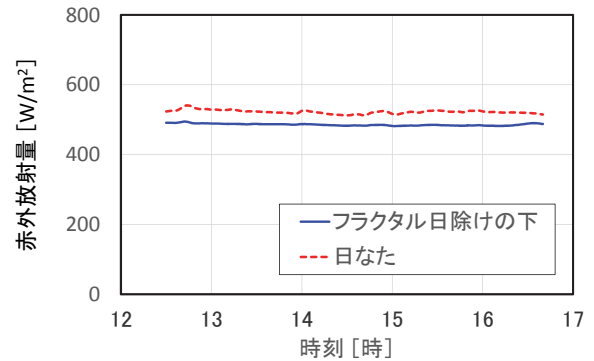
7月24日16時10分頃からフラクタル日除けの下の地点での下方向からの日射量が増加し、7月24日16時30分頃から16時40頃まではフラクタル日除けの下の地点と日なたの地点での下方向からの日射量がほぼ同じ値になっていた。この時間帯のフラクタル日除けの下の地点での上方向からの日射量が増加していないことを考慮すると、この時間帯にはフラクタル日除けの下の地点での下方向からの日射量の測定位置が、フラクタル日除けの外側の地点や隙間を通過して地面で反射した日射を捉えているために、日なたの地点での下方向からの日射量とほぼ同じ値になったと考えられる。

3-4 赤外放射量

フラクタル日除けの下の地点及び日なたの地点の2地点での、7月20日13時50分～16時及び7月24日12時30分～16時40分の下方向からの赤外放射量の測定結果を図7に示す。

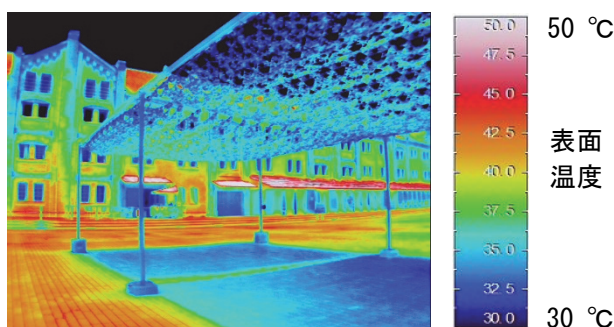


(ア) 下方向からの赤外放射量 (7月20日)



(イ) 下方向からの赤外放射量 (7月24日)

図7 下方向からの赤外放射量の測定結果



(ア) 赤外線サーモカメラの画像
(表示温度：30 °C～50 °C)



(イ) 可視カメラの画像

図8 地面の表面温度の測定結果

下方向からの赤外放射量は、調査期間内の全ての時間帯で、フラクタル日除けの下の地点では日なたの地点を下回っており、7月20日14時8分に最大で12%、調査期間中の平均では8%低下していた。

また、乾球温度の低下量が最大となる7月24日12時43分には、下方向からの赤外放射量は46 W/m²低下しており、低下量の割合は8%であった。

3-5 地面の表面温度

7月20日正午頃の、フラクタル日除けの下の地点及び日なたの地点の2地点での、地面の表面温度の測定結果を図8に示す。フラクタル日除けの下の地点での地面の表面温度(33 °C)は、日なたの地点の地面の表面温度(42 °C)よりも9 °C低下していた。

3-6 フラクタル日除けの暑さ対策効果

本調査の結果、乾球温度は、フラクタル日除けの下の地点では日なたの地点に比べて、7月24日12時43分に最大で1.4 °C低下していた。この時刻に、黒球温度は9.4 °C、暑さ指数は2.0 °C、上方向からの日射量は74% (736 W/m²)、下方向からの日射量は65% (146 W/m²)、下方向からの赤外放射量は8% (46 W/m²)、低下していた。また、7月20日正午頃に、フラクタル日除けの下の地点での地面の表面温度が、日なたの地点に比べて、9 °C低下していた。

内藤らが2014年7月29～31日に港北水再生センターの上部利用公園である太尾南公園（住所：大倉山七丁目40番1号）内の緑陰下で実施した調査¹⁵⁾では、緑陰下において、港北水再生センター内施設屋上（対象区）と比べて、乾球温度が最大で2.6℃低下し、この時刻に、黒球温度は12.2℃、暑さ指数は2.4℃、上方向からの日射量は93%（553 W/m²）、下方向からの日射量は66%（97 W/m²）、下方向からの赤外放射量は16%（96 W/m²）、低下していたことが分かっている。

本調査と過去に実施した太尾南公園内の緑陰下での調査では、公園内の緑陰下での調査時の方が気温が高いなど気象条件等が異なるため単純な比較はできないが、これらの測定結果を比較すると、フラクタル日除けの設置により、公園の緑陰下ほどではないものの、ある程度の暑さ対策の効果を期待できることが示唆される。本調査は、限られた時間帯での調査ではあるが、屋外でフラクタル日除けを用いた場合の暑さ対策効果のある程度、定量的に把握できたと考えられる。

4. おわりに

フラクタル日除け（樹木の葉の形状を模して放熱特性を高めた人工日除け）の暑さ対策効果を定量的に把握するため、2016年7月20日13時50分～16時、及び、7月24日12時30分～16時40分に、横浜赤レンガ倉庫において、フラクタル日除けの下の地点及び日なたの地点の2地点で、気温（乾球温度）、黒球温度、相対湿度、日射量及び赤外放射量を1分間隔で測定した。

本調査の結果、7月24日12時43分に、フラクタル日除けの下の地点での乾球温度が日なたの地点に比べて最大で1.4℃低下しており、この時刻に、黒球温度は9.4℃、暑さ指数は2.0℃、上方向からの日射量は74%、下方向からの日射量は65%、下方向からの赤外放射量は8%低下していた。また、7月20日正午頃に、フラクタル日除けの下の地点での地面の表面温度が、日なたの地点に比べて、9℃低下していた。

本調査の測定結果を、過去に実施した公園内の緑陰下での測定結果と比較したところ、フラクタル日除けの設置により、公園の緑陰下ほどではないものの、ある程度の暑さ対策の効果を期待できることが示唆された。

今後も、フラクタル日除けの暑さ対策効果について、更に詳細な調査や結果の分析を進め、フラクタル日除けの導入に係る費用対効果なども考慮しながら、本市におけるフラクタル日除け導入の可能性について検討を進めていく予定である。

謝 辞

本調査の実施にあたり、株式会社横浜赤レンガに調査場所を提供いただきました。この場を借りてお礼申し上げます。

文 献

- 1) 環境省：まちなかの暑さ対策ガイドライン、21-23（2017）
- 2) 酒井敏、中村美紀、大西将徳、飯澤功、古屋姫美愛：フラクタル日除け 樹木の形に学ぶ新発想のヒートアイランド対策、日本ヒートアイランド学会誌、5、17-22（2010）
- 3) 中村美紀、酒井敏、大西将徳、古屋姫美愛：フラクタル日除けによる放射環境改善効果、日本ヒートアイランド学会論文集、6、8-15（2011）
- 4) 三坂育正、成田健一、酒井敏、中村美紀：フラクタル形状日除けによる暑熱環境緩和効果の実測評価、日本ヒートアイランド学会第8回全国大会予稿集、134-135（2013）
- 5) 気象庁：気象観測の手引き、81pp.（1998）
- 6) C. P. Yaglou and D. Minard：Control of heat casualties at military training centers, *A. M. A. Arch. Ind. Health*, 16, 302-316（1957）
- 7) 日本生気象学会：日常生活における熱中症予防指針 Ver.3 確定版、<http://seikishou.jp/pdf/news/shishin.pdf>（2017年3月時点）
- 8) 公益財団法人日本体育協会：スポーツ活動中の熱中症予防ガイドブック（平成25年度改定版）、52pp.（2013）
- 9) International Organization for Standardization：ISO 7243:1989 Hot environments—Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature)（1989）
- 10) 日本工業規格：JIS Z 8504:1999 人間工学—WBGT（湿球黒球温度）指数に基づく作業者の熱ストレスの評価—暑熱環境（1999）
- 11) 日本工業規格：JIS Z 8806:2001 湿度—測定方法（2001）
- 12) O. Tetens:Über einige meteorologische Begriffe, *Z. Geophys.*, 6, 297-309（1930）
- 13) O. A. Alduchov and R. E. Eskridge：Improved Magnus form approximation of saturation vapor pressure, *J. Appl. Meteor.*, 35, 601-609（1996）
- 14) M. G. Lawrence：The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 86, 225-233（2005）
- 15) 内藤純一郎、小倉智代、山下理絵：横浜市内の水や緑による暑熱環境緩和効果に関する実測調査—農地・公園における熱放射観測結果一、横浜市環境科学研究所報、40、13-17（2016）